

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРКАЛА-КОМПЕНСАТОРА НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

*А. А. Сулбаев, С. А. Потанин, Б. С. Сафонов*

27 июля 2022

## 1. Краткий экскурс в адаптивную оптику

Турбулентность земной атмосферы создает неоднородности с разным показателем преломления, отчего качество изображения наземных телескопов ухудшается. Для исправления данных искажений Вавcock в 1953 [1] предложил использовать компенсатор волнового фронта, который в дальнейшем получил название адаптивной оптики с обратной связью. Современные системы АО действуют по схеме, показанной на рис. 1. Падающий свет, отражаясь от зеркал, разделяется на 2 пучка светоделительной пластинкой, один из которых идёт напрямую к матрице, а другой – на датчик волнового фронта. В это время компьютер считывает данные с датчика, производит расчёт и передаёт сигналы к зеркалам, которые уже исправляют искажённый волновой фронт.

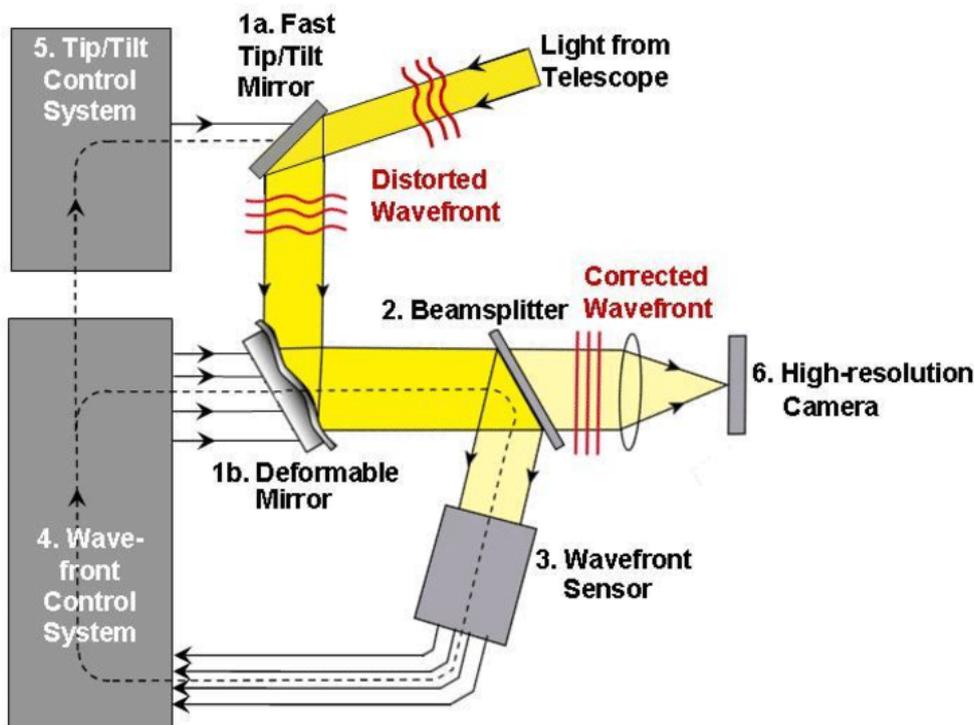


Рис. 1. Упрощённая схема действия АО

В паре с деформируемым зеркалом всегда используют зеркало–компенсатор наклона волнового фронта (Tip-tilt mirror). Его применение позволяет избавиться от «глобального» наклона, что позволит деформируемому зеркалу (deformable mirror) более точно подстроится под получившийся волновой фронт. Это позволяет использовать актюаторы с меньшей длиной хода, что выходит экономически выгоднее.

В астрономии адаптивная оптика используется для наблюдения за звёздами и галактиками, чей свет в атмосфере может искажаться или сливаться в одно световое пятно, если наблюдаемые

объекты расположены достаточно близко друг к другу. Дополнительные сложности для систем адаптивной оптики, применяемых в астрономии, создаёт слишком низкая для надёжной реконструкции волнового фронта яркость света от далёких звёзд и галактик.

Но как же нам численно оценить величину суммарных флуктуаций фазы (например атмосферы и двигателей монтировки)? Для этих целей очень удобно использовать полиномы Цернике.

Обозначим фазу световой волны, искаженной атмосферной турбулентностью, как  $\phi(\vec{r})$ , где  $\vec{r}$  – вектор двумерной координаты в плоскости зрачка. На некоторой круглой апертуре радиусом  $R$  эту фазу удобно представить в виде суммы полиномов Цернике [2]:

$$\phi(\vec{r}) \approx \sum_i^N a_i Z_i(\vec{r}/R). \quad (1)$$

Здесь  $Z_i$  — это полином номер  $i$ ,  $a_i$  — коэффициенты при полиномах, суммирование выполняется до некоторого  $N$ . Чем больше  $N$ , тем точнее выполняется аппроксимация (1). Полиномы Цернике представляют из себя произведение радиальных и сферических функций. Каждый из полиномов разных порядков отвечает за свою степень искажения волнового фронта (например, 5 и 6 порядки – отвечают за астигматизм, а 7 и 8 – за кому) (рис.2).

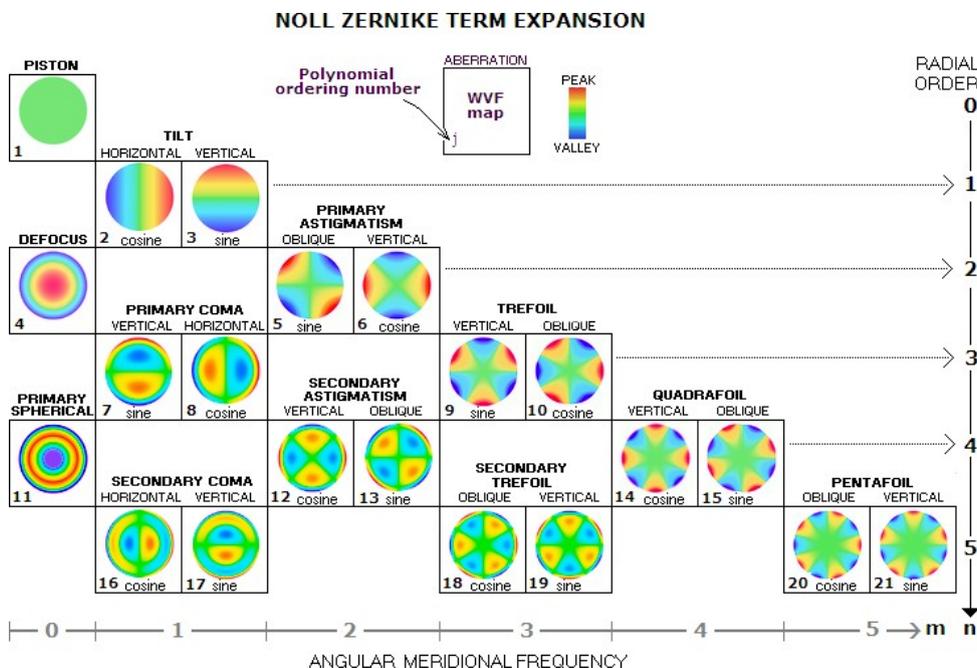


Рис. 2. Полиномы Цернике

Tip-tilt зеркала в силу своей конструкции способны компенсировать только полиномы первых радиальных порядков, так как последние описывают глобальный наклон поверхности:

$$Z_2 = 2\rho \cos(e), \quad Z_3 = 2\rho \sin(e), \quad (2)$$

где  $\rho$  – модуль радиус-вектора  $\vec{r}$ , нормированный на радиус апертуры;  $\rho$  меняется в диапазоне от 0 до 1,  $e$  – полярный угол. Подробнее рассмотрим дисперсию фазы волнового фронта. По определению, дисперсия некоторой величины  $x$ :

$$D(x) = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2. \quad (3)$$

$$D(x) = \langle x^2 \rangle, \quad (4)$$

$$\langle x \rangle^2 = 0$$

Полагая среднюю фазу равной нулю [2], для дисперсии фазы по зрачку можно записать:

$$\sigma_i^2 = \langle \phi^2 \rangle_R, \quad (5)$$

где  $\langle \rangle_R$  – усреднение по зрачку. В предположении Колмогоровской турбулентности для  $\sigma_i^2$  можно написать:

$$\sigma_i^2 = 1,0299 \left( \frac{2R}{r_0} \right)^{5/3}. \quad (6)$$

Единицы измерения RAD<sup>2</sup>. Здесь  $r_0$  – радиус Фрида, величина, характеризующая интенсивность атмосферной турбулентности. Учитывая свойство ортонормальности полиномов Цернике, можно записать:

$$\sigma_i^2 \approx \sum_i^N -\sigma_i^2, \quad (7)$$

где  $\sigma_i^2$  – дисперсия фазы, соответствующая полиному номер  $i$ . Для второго и третьего полинома [2]:

$$\sigma_2^2 = \sigma_3^2 = 0,448 \left( \frac{2R}{r_0} \right)^{5/3}. \quad (8)$$

Дисперсия волнового фронта после коррекции наклонов составляет 13 % от исходной полной дисперсии. Таким образом исправление наклонов волнового фронта зеркалом tip-tilt в 7,6 раз ослабляет требования к диапазону движения деформируемого зеркала.

$$\langle a_{2,3} \rangle = (\Delta_1 - \Delta_2) + (\Delta_2 - \Delta_3) = 0,8959 \approx 89 \% \quad (9)$$

Для 70-см телескопа АЗТ-2 ожидается качество изображение 1.5" на длине волны 500 нм, что соответствует  $r_0 = 7$  см. Таким образом полное среднеквадратическое отклонение (СКО) фазы составит  $\sigma_i = 6,8$  RAD. СКО фазы, соответствующей наклонам волнового фронта, будет  $\sigma_{2,3} = 4,5$  RAD. Согласно определению полиномов Цернике, соответствующих наклонам (9), СКО угла наклона волнового фронта по одной координате  $\sigma_\alpha = 2\sigma_{2,3}(\lambda/(2\pi R))$ . Для АЗТ-2 ожидается  $\sigma_\alpha = 0,21''$ . Наклоны волнового фронта распределены по нормальному закону, следовательно, если зеркало будет обеспечивать наклон  $\pm 5\sigma_\alpha$ , то система будет работать в  $1-5 \times 10^{-7}$  случаев.

Также стоит указать на тот факт, что искажения вносятся не только атмосферой. Паразитные наклоны могут создаваться из-за, например, погрешностей ведения телескопа, дрожанием конструкции из-за ветра и т. д.

Еще предполагается использование этого зеркала для точной доводки и удержания объекта в центре поля зрения, что накладывает требования на наклон порядка 10 угловых секунд. Этот угол с запасом покрывает величину атмосферных искажений и других флуктуаций, поэтому на это значение и стоит опираться при расчете хода актюаторов. С помощью несложных формул тригонометрии получаем необходимый ход актюатора:

$$h = d \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) \approx 10 \text{ мкм} \quad (10)$$

где  $\alpha = 10''$ , а  $d = 10$  мм – апертура tip-tilt зеркала.

Почему недостаточно двигать телескопом? Исходя из того, что характерное время когерентности атмосферы составляет порядка 3 мс, можно с уверенностью сказать, что «подруливать» целым телескопом будет невозможно, так как это нужно делать на частоте порядка 300 Гц, а этому мешают двигатели монтировки, что не имеют особой скорости и точности для таких задач и телескоп, который имеет значительную инерцию.

## 2. Как устроены зеркала компенсации наклонов? Пьезоактюаторы, катушки.

Зеркала компенсации наклонов – плоские. Они крепятся к пьезоактюаторам, которые целиком ими управляют.

Как пример, рассмотрим PI-S330, установленный на 1,3 метровом телескопе [3]. Это пьезоактюатор с двумя ортогональными осями, имеющий разрешение в 0,5 микрорадиан при боковом наклоне в 10 миллирадиан. Он рассчитан на высокие частоты работы – до 1.6 кГц, имеет превосходную стабильность и работает с зеркалами диаметром более 50 мм.

В нашей же экспериментальной установке мы использовали весьма простую и доступную схему установки зеркала. Была сделана стеклянная подложка, к которой приклеивались пьезоактюаторы. Для увеличения диапазона наклонов актюаторы были наклеены друг на друга и соединены параллельно (рис. 3).

Самих точек крепления было четыре, что потребовало как минимум 2 канала управления, о чем пойдёт речь в следующем параграфе.

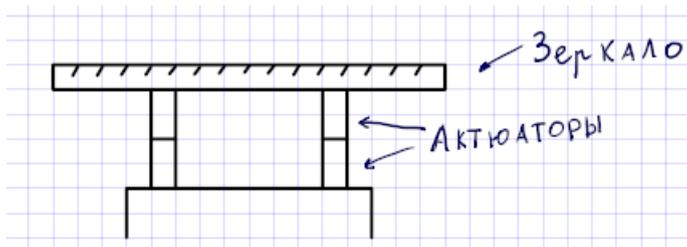


Рис. 3. Устройство зеркала с актюаторами

Зеркало на катушках<sup>1</sup>.

## 3. Как производится измерение наклонов волнового фронта?

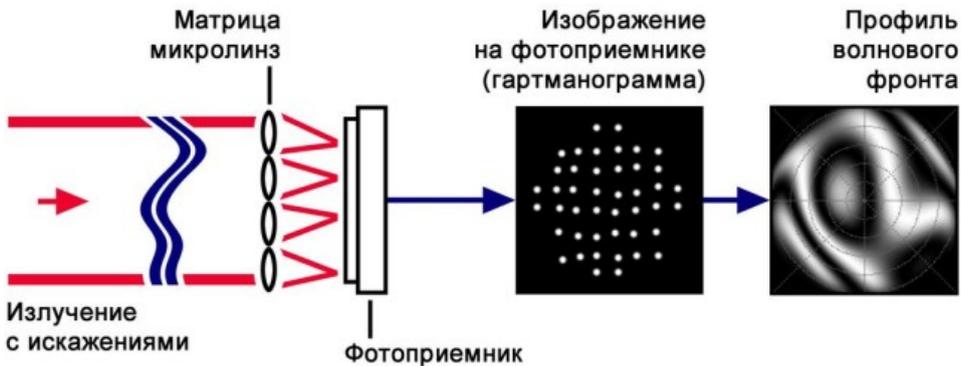


Рис. 4. Принцип действия датчика Шака-Гартмана

Согласно схеме, представленной выше, излучение попадает на датчик Шака Гартмана, который представляет из себя матрицу из микролинз, сложенных достаточно плотно. Приходящий искажённый волновой фронт по разному преломляется в данных линзах, и в постобработке на ПК на выходе получается профиль искажённого фронта. Затем через ПК происходит управление зеркалами. Значения напряжений на актюаторы рассчитываются при помощи наложения различных полиномов Цернике на получившуюся картину искажённого волнового профиля.

<sup>1</sup> <https://www.physikinstrumente.com/en/products/rotation-stages/v-931-high-dynamics-pimag-voice-coil-tiptilt-platform-412418468/specification>

#### 4. Практическое тестирование возможностей зеркала

Для исследования характеристик зеркала (АЧХ и ФХ), мы собрали всё необходимое в лаборатории на базе КГО и начали работу со сборки стенда. Выше мы уже указали устройство зеркала в сборе с актюаторами. Сама схема весьма проста по виду: светодиод (вскоре заменённый лазером) светит через диафрагму диаметром 20 микрон. Луч попадает на зеркало, отражается от него, проходит через собирающую линзу и фиксируется камерой FLIR BFS-PGE-16S2M-CS (рис. 5). Все видео с большим трудом (из-за недостаточной мощности ноутбука) снимались на экспозиции в 1 миллисекунду на 786 FPS. Для фиксации задержки по фазе рядом с диафрагмой был прикреплён светодиод, напрямую соединённый с генератором.

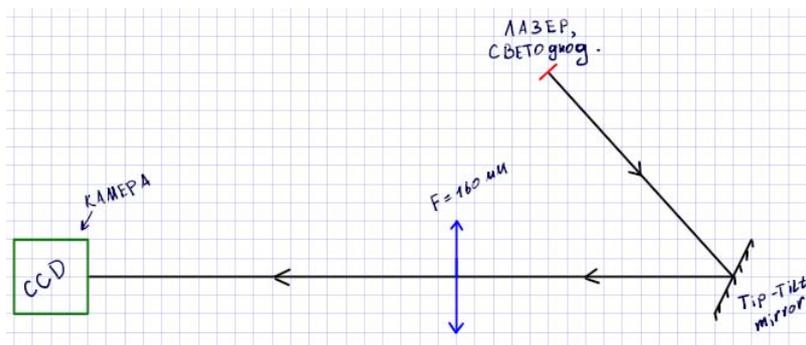


Рис. 5. Примерная оптическая схема установки

Для работы актюаторов было необходимо 2 величины напряжения: средняя точка (порядка 16–30 В) и максимум (30–60 В). Эти значения были обеспечены самодельным блоком управления. Он состоит из связки четырёх блоков питания и операционных усилителей с коэффициентом усиления около 16. В качестве генератора был использован ГЗ-34. Напряжение варьировалось от 1 до 3 вольт.

#### 5. Программная обработка данных

Для обработки была написана программа на Python. Для определения фазовой характеристики строился график колебаний яркости светодиода, напрямую соединённого с генератором и одновременно с ним ещё один график, который показывал положение отражения лазера (с большей амплитудой). В ходе анализа зависимостей фазовой задержки выявлено не было до частоты в 320 герц. Дальнейшие измерения были бесполезны из-за недостаточной частоты видеозаписи (рис. 6).

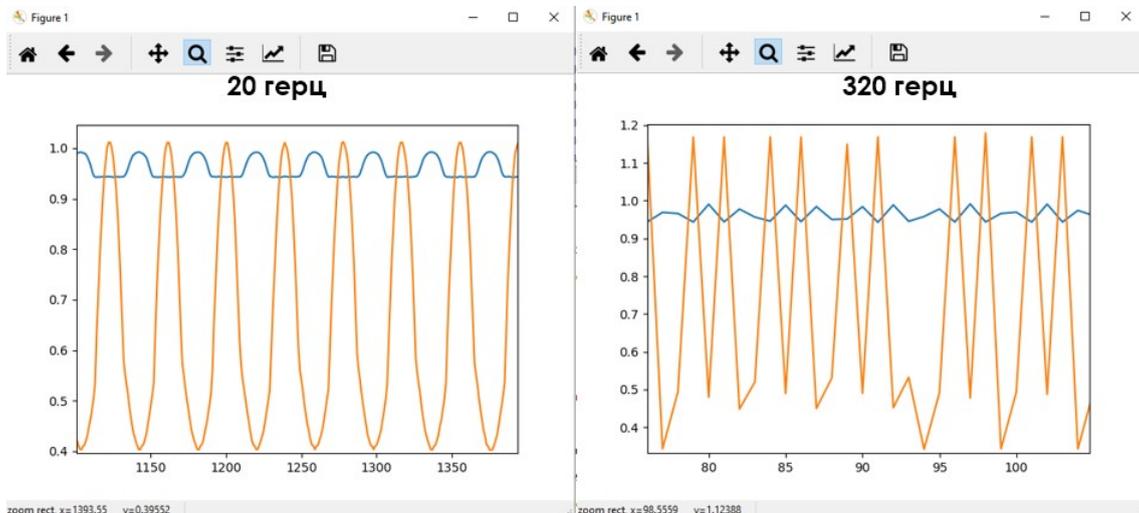


Рис. 6. Вычисление ФХ

Для вычисления АЧХ было принято решение снимать один кадр с экспозицией в 10 мс. Напряжение на генераторе также было уменьшено с 3 до 1 вольта для безопасности. Был заснят промежуток частот от 20 до 1600 герц. По итогу программной обработки было выявлено 2 резонансных частоты: 400 и 900 герц. Для нормальной работы на телескопе нам достаточно частоты колебаний зеркала в 200 герц.

### **Итоги исследования**

По итогу данного тестирования можно смело сделать вывод, что даже зеркало–компенсатор наклонов волнового фронта «кустарного» производства вполне соответствует необходимыми требованиями для астрономических наблюдений.

В будущем планируется установка этого зеркала на 70-см телескоп АЗТ-2 в ГАИШ г. Москва. Будет произведено тестирование системы обратной связи, датчика Шака-Гартмана и первого образца деформируемого зеркала

### **Список литературы**

1. Babcock H. W. The Possibility of Compensating Astronomical Seeing., 65(386):229, October 1953.
2. Noll R. J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *Journal of the Optical Society of America (1917–1983)*, 66:207–211, March 1976.
3. Sreekanth Reddy Vallapureddy, Ravinder Kumar Banyal, Sridharan Rengaswamy, P. Umesh Kamath, and Aishwarya Selvaraj. Development of image motion compensation system for 1,3 m telescope at Vainu Bappu Observatory. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 20(1):012, January 2020.